



University of Tehran

Forest type mapping using PRISMA imagery in the Kheyroud forest

Marjan Firoozy Nejad¹ | Parviz Fatehi^{2*} | Ali Asghar Darvish Sefat³ | Vahaid Nasiri⁴

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Email: firoozy.marjan@ut.ac.ir

2. Corresponding author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Email: parviz.fatehi@ut.ac.ir

3. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Email: adarvish@ut.ac.ir

4. Department of Forest Resources Management, Faculty of Forestry, University of Agriculture in Krakow, Krakow, Poland.

Email: vahid.nasiri@urk.edu.pl

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 28 August 2024

Revised: 16 October 2024

Accepted: 23 October 2024

Published online: 15 December 2024

Keywords:

Forest type,
Hyperspectral images,
MNF,
PRISMA,
SVM.

Mapping forest types is essential for sustainable management, however, field methods are time-consuming and costly. Therefore, Modern remote sensing, especially hyperspectral imagery like PRISMA with 243 spectral bands, is valuable for mapping Hyrcanian mixed forests. However, its accuracy and capabilities must be assessed. In this study, the capability of PRISMA data was assessed using SVM, SAM, and RF classification approaches to create forest type maps for the Gorazbon district of Kheyroud Forest. A ground truth map consisting of 131 field sample plots, each measuring 45 × 45 m, was generated using Kuchler's abundance method based on the 100 trees with the largest diameters. Five forest types were identified: pure beech, mixed-beech, beech-hornbeam, hornbeam-beech, and mixed hornbeam. Geometric correction, smoothing and noise filtering was applied, then, Illumination correction was performed. Anomalies were detected using the RX algorithm. The minimum noise fraction (MNF) transformation and pixel purity index (PPI) were applied to the remaining 103 spectral bands and then used in the classification process. Additionally, indices such as NDVI, ReNDVI, MTCI, NDired, and RTVI were incorporated into the classification process. The results showed that the SVM and RF algorithms achieved overall accuracies of 53.09% and 43.19%, with kappa coefficients of 0.38 and 0.25, respectively. The best combination of input data was derived from the spectral bands obtained through the MNF transformation. Based on the findings, high noise in PRISMA imagery and the similar spectral behavior of forest types in this region hindered the species discrimination and classification performance.

Cite this article: Firoozy Nejad, M. Fatehi, P., Darvish Sefat, A.A., Nasiri, V. (2024). Forest type mapping using hyperspectral (PRISMA) imagery in Kheyroud forest. *Journal of Forest and Wood Products*, 77 (3), 249-264. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwp.2024.381635.1312>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwp.2024.381635.1312>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

تهیه نقشه تپ جنگل با استفاده از تصاویر ابرطیفی پریشما در جنگل خیرود

مرجان فیروزی نژاد^۱ | پرویز فاتحی^{۲*} | علی اصغر درویش صفت^۳ | وحید نصیری^۴

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: firoozy.marjan@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: parviz.fatehi@ut.ac.ir
۳. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: adarvish@ut.ac.ir
۴. گروه مدیریت منابع جنگلی، دانشکده جنگلداری، دانشگاه کشاورزی کراکوف، کراکوف، لهستان. رایانامه: vahid.nasiri@urk.edu.pl

چکیده

اطلاعات مقاله

آگاهی از تپ جنگل یکی از موارد ضروری در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار جنگل بوده، ولی تهیه نقشه آن به روش‌های میدانی زمان‌بر و پرهزینه است. از این‌رو، سنتجش‌ازدور به‌ویژه استفاده از داده‌های ابرطیفی همانند ماهواره پریشما با ۲۴۳ باند طیفی، می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب تلقی شود. پژوهش پیش‌رو به ارزیابی قابلیت این تصاویر براساس روش‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM)، نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) و جنگل تصادفی (RF) در بخش گرازبن جنگل خیرود پرداخته است. نقشه واقعیت زمینی در ۱۳۱ قطعه‌نمونه با ابعاد ۴۵×۴۵ متر به‌طور میدانی با روش کوچلر و براساس فراوانی ۱۰۰ اصله از قطورترین درختان تهیه و پنج تپ شامل راش خالص، راش آمیخته، راش-ممرز، ممرز-راش و ممرز آمیخته مشخص شد. تصحیح هندسی تصاویر، رفع نویز و نرم‌سازی منحنی طیفی انجام و سپس اثر انحنای طیفی تصحیح شد. الگوریتم آشکارسازی ناهنجاری‌ها بر روی تصویر اعمال و باندهای دارای نویز و محدوده‌های جذب آب حذف شدند. سپس بر روی ۱۰۳ باند طیفی باقی‌مانده، الگوریتم حداقل سهم نویز و شاخص خلوص پیکسل برای یافتن پیکسل‌های خالص طیفی اجرا و در طبقه‌بندی بکار گرفته شدند. همچنین، شاخص‌های NDVI، ReNDVI، MTCI، NDired و RTVI محاسبه و به مجموعه باندی اضافه شدند. الگوریتم‌های SVM و RF به‌ترتیب با صحت کلی ۵۳/۰۹ و ۴۳/۱۹ و ضریب کاپای ۰/۳۸ و ۰/۲۵ و استفاده از باندهای حاصل از الگوریتم حداقل سهم نویز، بهترین نتایج را نشان دادند. به‌طور کلی، نویز به نسبت زیاد داده‌های پریشما و رفتار طیفی نزدیک تپ‌های مورد مطالعه به‌رغم انجام پردازش‌ها و بکارگیری الگوریتم‌های طبقه‌بندی مناسب، مانع از کسب نتایج رضایت‌بخش شد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

کلیدواژه:

الگوریتم حداقل سهم نویز،

پریشما،

تصاویر ابرطیفی،

تپ جنگل،

ماشین بردار پشتیبان.

استناد: فیروزی نژاد؛ مرجان، فاتحی؛ پرویز، درویش صفت؛ علی اصغر، نصیری؛ وحید (۱۴۰۳). تهیه نقشه تپ جنگل با استفاده از تصاویر ابرطیفی پریشما در جنگل خیرود. نشریه

جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۷ (۳)، ۲۶۴-۲۴۹. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.381635.1312>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسنده‌گان.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2024.381635.1312>



۱. مقدمه

برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح جنگل‌های هیرکانی مستلزم در اختیار داشتن اطلاعات صحیح و به‌هنگام است [۱]. در یک ناحیه جنگلی بسته به شرایط فیزیوگرافی و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک، واحدهای به نسبت کوچک و همگنی به‌وجود می‌آید که آنها را تیب جنگل و یا واحدهای همگن اکولوژیک جنگل گویند [۲]. تیب‌های جنگلی از نظر گونه‌های درختی، نیازمند روش‌های جنگل‌شناسی و جنگلداری خاص خود برای مدیریت هستند که در این راستا، تهیه نقشه به‌هنگام و دقیق آنها، گامی مهم به‌شمار می‌رود. به‌منظور تهیه نقشه تیب جنگل می‌توان از پیمایش زمینی و قطعه‌نمونه‌های آماربرداری بهره جست [۳]. با توجه به زمان‌بر و هزینه‌بر بودن روش‌های میدانی، خصوصاً در مناطق کوهستانی و با دسترسی سخت جنگل‌های هیرکانی، سال‌ها است که استفاده از علم و فن‌سنجش از دور مورد توجه قرار گرفته است. در این زمینه، ابتدا داده‌های چندطیفی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند از جمله در مطالعات Shataei Joibari و همکاران (۲۰۰۲) [۴]، Darvishsefat و همکاران (۲۰۰۹) [۵]، Sheykhi و همکاران (۲۰۲۰) [۶] و Nasiri (۲۰۲۰) [۷] که با بکارگیری داده‌های چندطیفی لندست و سنتینل اقدام به تهیه نقشه تیب جنگل در بخش‌هایی از جنگل‌های هیرکانی داشتند. استفاده از داده‌های ابرطیفی^۱ که بازتاب پدیده‌ها را در تعداد زیادی باند با دامنه طیفی باریک و پیوسته ثبت می‌کند، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این فناوری به‌طور قابل توجهی می‌تواند اطلاعات بیشتری نسبت به داده‌های چندطیفی متداول ارائه دهد [۸] و امکان طیف‌نگاری دقیق سطح زمین را فراهم آورد [۹] و به‌بیان ویژگی‌های پدیده‌های مختلف کمک کند [۱۰]. اولین ماهواره طیف‌سنجی تصویری، EO-1 بوده که سنجنده Hyperion آن با ۲۲۰ باند با تفکیک مکانی ۳۰ متر از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ فعال بوده است. هرچند که استفاده از داده‌های این ماهواره رایگان بوده، ولی به‌دلیل پایین بودن نسبت سیگنال به نویز در بسیاری از باندها [۱۱] و نبود تصاویر مناسب از جنگل‌های هیرکانی، تاکنون پژوهش و مطالعه‌ای با این داده‌ها در این مناطق انجام نشده است. جدیدترین ماهواره در این زمینه، ماهواره پریسما^۲ PRISMA از آژانس فضایی ایتالیا که در سال ۲۰۱۹ به فضا پرتاب شده است. این ماهواره قادر به برداشت تصاویر در ۲۴۳ باند طیفی پیوسته در دامنه ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است. تفکیک مکانی آن ۳۰ متر و همچنین دارای باند پانکروماتیک با اندازه تفکیک مکانی ۵ متر است [۱۲]. انتظار می‌رود که داده‌های رایگان آن برای بسیاری از زمینه‌ها از جمله جنگلداری از کارایی مناسبی برخوردار باشد [۱۰]. با توجه به ماهیت این نوع داده‌ها و ارائه منحنی بازتاب طیفی پیوسته برای هر پیکسل، روش‌های خاصی برای پردازش و تجزیه و تحلیل آن مانند جداسازی طیفی^۳ و نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM^۴) توسعه یافته‌اند. البته الگوریتم‌های نوین دیگر ماشین بردار پشتیبان (SVM^۵)، شبکه عصبی مصنوعی، روش درخت تصمیم نیز برای تحلیل داده‌های ابرطیفی کاربرد دارند [۹].

در ارتباط با بکارگیری داده‌های ابرطیفی، Darvishsefat (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های هوایی HyMap با ۱۲۸ باند و اندازه پیکسل ۷/۵ متر از جنگلی ناهمگن ناهمسال و مخلوطی از گونه‌های پهن‌برگ و سوزنی‌برگ در کشور سوئیس را برای تیب‌بندی بررسی و از روش جداسازی طیفی خطی برای طبقه‌بندی استفاده کرد. صحت کلی نقشه حاصل ۹۵ درصد بود، ولی بیان شد که تعیین حد آستانه در تصاویر ساده نیست، چراکه ترکیب بازتاب پدیده‌ها در پیکسل عملاً خطی نیست بنابراین نیاز به توسعه تکنیک‌های جامع‌تری می‌باشد [۱۳]. Puletti و همکاران (۲۰۱۶)، از تصاویر ابرطیفی ماهواره‌ای Hyperion برای تفکیک جنگل‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در منطقه‌ای به وسعت ۱۱۰۰ کیلومتر مربع در ایتالیا استفاده نمود. در این مطالعه، از الگوریتم‌های جنگل تصادفی (RF^۶) و ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج نشان داد که داده‌های Hyperion و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان قابلیت خوبی در راستای هدف داشته‌اند [۱۴]. Vaglio Laurin و همکاران (۲۰۱۶)، در جنگل‌های گرمسیری غنا، تمایز بین دو نوع تیب مختلف جنگلی را با استفاده از تصاویر ابرطیفی هوایی AISA^۷ بررسی نمودند. از ۲۴۴ باند طیفی باندهای دارای نویز حذف و

^۱Hyperspectral

^۲Precursore IperSpettrale della Missione Applicativa

^۳Spectral unmixing

^۴Spectral Angle Mapper

^۵Support vector machine

^۶Random Forest

^۷Airborne Imaging Spectrometer

۱۸۶ باند باقی‌مانده در پردازش‌ها استفاده و الگوریتم حداقل سهم نویز (MNF^1) بکار گرفته شد. نتایج طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با صحت کلی ۹۲/۳۴ و ضریب کاپای ۰/۹۲ گویای تفکیک مناسب تیپ‌های جنگلی بود [۱۵]. Raczko و Zagajewski (۲۰۱۷)، الگوریتم‌های جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی را به منظور شناسایی ۵ گونه درختی (*Picea alba*, *Larix decidua*, *Alnus mill*, *Fagus sylvatica* and *Betula pendula*) در بخش شمال غربی پارک ملی لهستان با استفاده از تصاویر ابرطیفی APEX^۲ مورد مقایسه قرار دادند. ابتدا ۲۸۸ باند طیفی پس از حذف باندهای نویزی به ۲۲۲ باند طیفی کاهش یافت، سپس روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA^3) اجرا و در نهایت طبقه‌بندی با ۴۰ باند طیفی انجام شد. ضریب کاپا سه الگوریتم یاد شده به ترتیب برابر با ۰/۵۲، ۰/۶۱ و ۰/۷۲ بوده است [۱۶]. Xu و Luo (۲۰۱۹)، در جنوب چین و با استفاده از داده‌های ابرطیفی HJ-1A، اقدام به طبقه‌بندی با چهار طبقه جنگل‌های سوزنی برگ، پهن برگ، آمیخته و مناطق غیرجنگلی کردند. الگوریتم شبکه باور عمیق (DBN^4) با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نیز مورد مقایسه قرار گرفت که صحت کلی طبقه‌بندی ۸۵/۸ درصد و ضریب کاپا ۰/۷۸ بیانگر عملکرد بهتر الگوریتم شبکه باور عمیق بود [۱۷]. Sabat Tomala و همکاران (۲۰۲۰)، الگوریتم‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی به منظور بررسی گونه‌های گیاهی مهاجم در منطقه‌ای به وسعت ۱۰/۶ کیلومتر مربع در جنوب لهستان و با استفاده از داده‌های ابرطیفی هواپرد HySpex مورد مقایسه قرار دادند. طبقه‌بندی بر روی دو گروه مجموعه باندی (۴۳۰ باند طیفی اصلی و ۳۰ باند حاصل از الگوریتم حداقل سهم نویز) و با ۵۰ درصد از نمونه‌ها انجام شد. بهترین نتیجه براساس ۳۰ باند حاصل از الگوریتم حداقل سهم نویز و ماشین بردار پشتیبان به دست آمد (صحت کلی بالاتر از ۹۰ درصد) [۱۸]. Vangi و همکاران (۲۰۲۱) قابلیت تصاویر ماهواره ابرطیفی پریسما را در تفکیک و شناسایی تیپ‌های جنگلی در دو منطقه وسیع در مرکز ایتالیا مورد بررسی و نتایج را با داده‌های سنتینل ۲ مقایسه کردند [۱۰]. براساس نتایج، داده پریسما، امکان تفکیک بهتر تیپ‌های جنگل را فراهم کرده و محدوده طیفی SWIR به‌عنوان مناسب‌ترین دامنه برای این منظور پیشنهاد شد. همچنین، داده‌های پریسما توانسته تمایز بین دو گروه سوزنی‌برگان و پهن‌برگان را در منطقه یک، ۵۰ درصد و در منطقه دو حدود ۳۰ درصد بهبود بخشد و تمایز تیپ جنگلی را ممکن سازد. تجزیه و تحلیل تفکیک‌پذیری گویای نتایج بهتر پریسما نسبت به سنتینل ۲ بود.

پیشینه پژوهش بیان شده بیانگر ضرورت ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های طبقه‌بندی پیش از بکارگیری آنها در پروژه‌های اجرایی در جنگل‌های هیرکانی است، بنابراین قابلیت داده‌های ابرطیفی پریسما بررسی و اقدام به مقایسه الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان، نقشه‌بردار زاویه طیفی و جنگل تصادفی جهت تهیه نقشه تیپ در بخشی از این جنگل‌ها شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه پژوهش

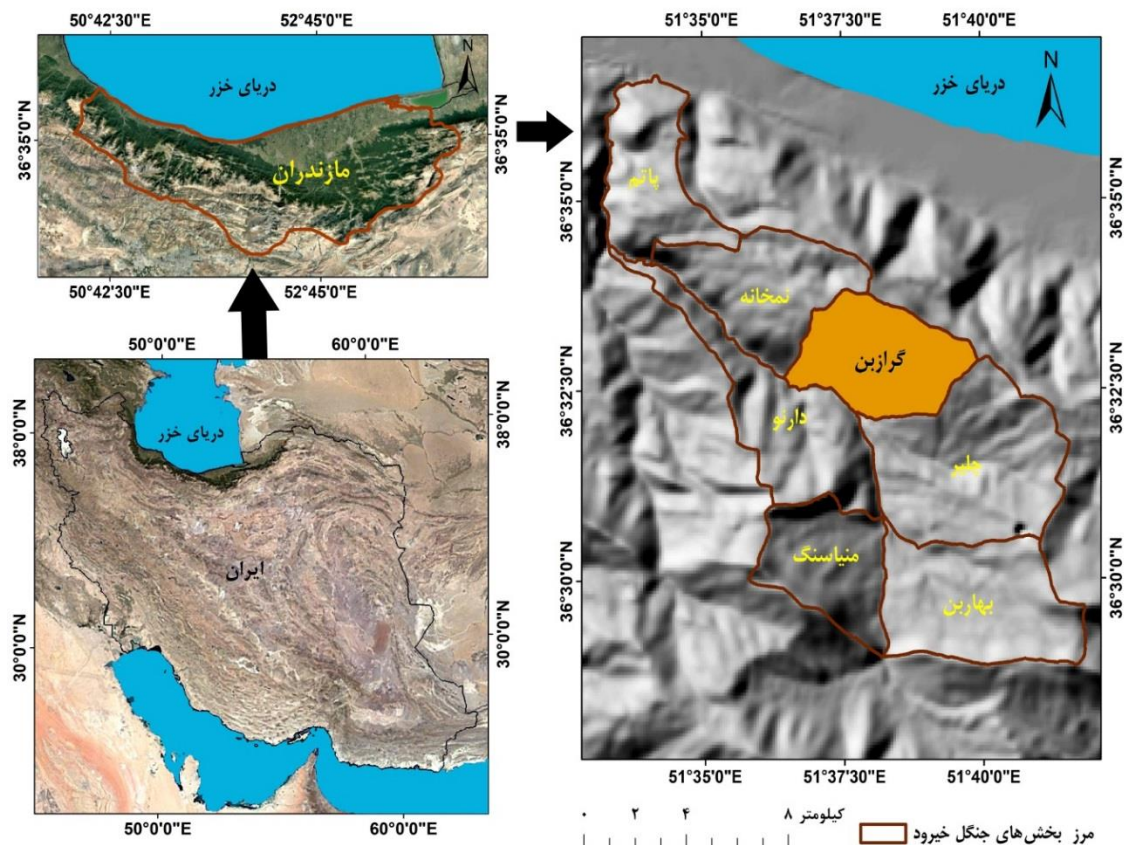
بخش گرازین به وسعت حدود ۱۰۰۰ هکتار، سومین بخش از جنگل تحت مدیریت دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران است که در هفت کیلومتری شرق نوشهر در $51^{\circ}36'25''$ تا $51^{\circ}39'56''$ طول شرقی و $36^{\circ}32'6''$ تا $36^{\circ}33'49''$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این بخش در ارتفاع ۵۵۰ تا ۱۳۸۰ متر از سطح دریا قرار دارد [۱۹]. گونه‌های غالب منطقه عبارتند از ممرز (*Carpinus betulus*)، راش (*Fagus orientalis*)، بلوط (*Quercus sp.*)، توسکای بیلاقی (*Alnus subcordata*)، افرا شیردار (*Acer cappadocicum*)، متوسط بارش ۱۳۰۰ میلی‌متر و حداقل بارندگی در تیرماه و حداکثر آن در مهرماه رخ می‌دهد. همچنین، میانگین دمای سالانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد است [۷، ۲۰].

¹Minimum Noise Fraction

²Airborne Prism Experiment

³Principal Component Analysis

⁴Deep belief network



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در ایران (الف)، استان مازندران (ب) و بخش گرازین جنگل خیرود (ج)

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، از داده‌های ماهواره ایتالیایی پریشما که قادر به برداشت تصاویر در ۲۴۳ باند طیفی پیوسته در دامنه ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر در دو محدوده طیفی VNIR^۱ و SWIR^۲ است، استفاده شد. عرض نوار برداشت آن ۳۰ کیلومتر بوده و تفکیک‌های طیفی ۱۲ نانومتر و مکانی ۳۰ متر را دارد. همچنین دارای یک باند پانکروماتیک با اندازه تفکیک مکانی ۵ متر است [۱۲]. داده‌ها در سه سطح L0، L1 و L2 ارائه می‌شوند. سطح L2 خود شامل سه سطح C، B و D با اعمال پردازش‌های بیشتر بر روی تصاویر است. در سطح L2D، تصحیحات هندسی و همچنین تصحیح اتمسفری انجام و داده‌ها به صورت بازتاب طیفی^۳ ارائه می‌شوند. در این پژوهش، از داده سطح L2D به تاریخ ۲۳ اکتبر ۲۰۲۱ در دو محدوده‌های VNIR و SWIR استفاده شد.

۲-۳. داده‌های میدانی

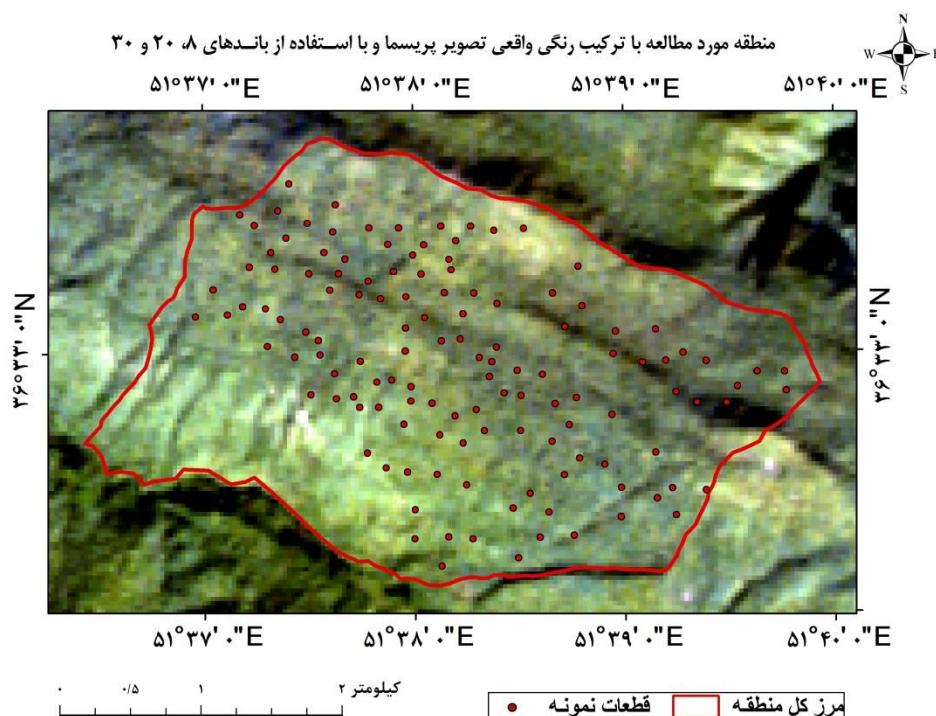
به منظور تهیه نمونه‌های تعلیمی و همچنین تهیه نقشه واقعیت زمینی برای برآورد صحت نقشه‌های تیب جنگل حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های پریشما کار میدانی انجام شد. برای تهیه جنگل‌پیمایی در خردادماه ۱۴۰۱، ابتدا قطعه‌نمونه‌های مربعی شکل در ابعاد ۴۵ × ۴۵ متر با حداقل فاصله ۲۰۰ متر تعیین و مختصات مرکز قطعه‌نمونه‌ها در دستگاه GPS مدل Garmin Map64s وارد شد. در هر قطعه‌نمونه قطر درختان (قطرتر از ۱۲/۵ سانتی‌متر) و نوع گونه آنها ثبت شد. در مجموع، ۱۳۱ قطعه‌نمونه (با احتساب داده‌های قطعه‌نمونه مشابه از پژوهش Nasiri (۲۰۲۰) [۷]) استفاده و نوع تیب در هر قطعه‌نمونه با روش کوچلر [۲] و براساس

^۱Visible and near infrared

^۲Short-wave infrared

^۳Reflectance

درصد فراوانی درختان (حضور غالب) تعیین و نقشه واقیعت زمینی با پنج تیپ راش خالص، راش آمیخته (به‌عنوان تیپ فرعی)، راش-ممرز، ممرز-راش و ممرز آمیخته (به‌عنوان تیپ فرعی) تهیه شد (شکل ۲).



شکل ۲. پراکنش قطعه‌نمونه‌های برداشت شده در بخش گرازین

۲-۴. پیش‌پردازش تصویر

با روی هم‌گذاری لایه راه‌های منطقه استخراج شده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ بر تصاویر ماهواره‌ای، کیفیت هندسی تصاویر مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد تصاویر از هندسه مناسبی برخوردار نیستند. بر همین اساس، تصحیح هندسی با نقاط کنترل زمینی انجام شد. در ادامه داده‌ها از لحاظ پیکسل‌های از دست‌رفته و وجود ابر بازبینی شدند. پس از حذف باندهای دارای همپوشانی در محدوده ۹۴۲ تا ۹۶۲ نانومتر (۴ باند)، نرم‌سازی^۱ و رفع نویز^۲ با استفاده از روش ساویتزکی-گولی^۳ انجام شد [۲۱]. این روش باعث زدودن نویز در داده‌های پیوسته می‌شود و در مطالعات طیف‌سنجی کاربرد دارد [۲۲، ۲۳]. در ادامه اقدام به تصحیح اثر انحنای طیفی در تصویر شد که تحت عنوان Smile از آن یاد می‌شود و در سنجنده‌های ابرطیفی خطی پوش بروم^۴ دیده می‌شود [۲۴، ۲۵]. ماژول Cross Track Illumination Correction نرم‌افزار ENVI برای این منظور استفاده شد [۲۶، ۲۷]. در مرحله بعد، محدوده‌های جذب آب در طول موج‌های ۱۳۴۹ تا ۱۴۵۹ نانومتر و ۱۷۹۳ تا ۱۹۷۵ نانومتر حذف گردیدند [۲۸]. سپس از روش رید-شیاولی (RX^۵) به‌عنوان یک آشکارساز ناهنجاری^۶ متداول در تصاویر ابرطیفی، برای تشخیص پیکسل‌هایی با ویژگی‌های طیفی متفاوت استفاده شد [۲۹]. در مجموع ۱۴۰ باند دارای نویز و پیکسل از دست‌رفته به‌دلیل کیفیت نامناسب داده حذف و ۱۰۳ باند طیفی در محدوده‌های طیفی ۵۴۶-۹۷۸ (VNIR) و ۹۸۸-۲۲۸۳ (SWIR) نانومتر در پردازش‌های تکمیلی استفاده شدند.

^۱Smoothing

^۲Noise-filtering

^۳Savitzky-Golay

^۴Pushbroom

^۵Reed-Xiaoli

^۶Anomaly Detection

۲-۵. پردازش تصویر

روش‌های متعددی برای پردازش و آماده‌سازی تصاویر و تولید باندهای جانبی به‌منظور استخراج هرچه بهتر اطلاعات وجود دارد. در این مطالعه از الگوریتم حداقل سهم نویز (MNF) و تعدادی شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده شد. همچنین با استفاده از شاخص‌های M-Statistic و جفریس ماتوسیتا^۱ [۳۰] تفکیک‌پذیری تیب‌ها بررسی شد.

۲-۵-۱. الگوریتم حداقل سهم نویز

باریک بودن پهنای باند در داده‌های ابرطیفی موجب ایجاد نویز و بنابراین کاهش نسبت سیگنال به نویز در تصاویر مربوطه می‌شود، از این رو به‌منظور کاهش نویزهای احتمالی در باندها، الگوریتم حداقل سهم نویز که در واقع اصلاح شده تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) می‌باشد، بکار گرفته شد [۳۱]. اجرای این الگوریتم، باندهایی که بیشترین مقدار ویژه^۲ را دارا هستند انتخاب می‌شوند.

۲-۵-۲. شاخص خلوص پیکسل (PPI^۳)

پس از بکارگیری الگوریتم حداقل سهم نویز، شاخص خلوص پیکسل جهت پیدا کردن خالص‌ترین طیف‌ها استفاده شد. شاخص خلوص پیکسل برای یافتن پیکسل‌های خالص طیفی در تصاویر ابرطیفی استفاده می‌شود [۳۲]. در باند حاصل از این شاخص، پیکسل‌های روشن، موقعیت عضوهای نهایی^۴ را نشان می‌دهد [۳۳]. در این روش، انتخاب طیف عضوهای نهایی به‌صورت چشمی از میان یک ابر پیکسلی در فضای n بعدی صورت می‌پذیرد [۲۶، ۳۴] و کلاس‌های انتخاب شده به‌عنوان ورودی برای تجزیه و تحلیل‌های طبقه‌بندی استفاده می‌شود.

۲-۵-۳. شاخص پوشش گیاهی

تاکنون شاخص‌های پوشش گیاهی متعددی برای ارزیابی و برآورد ویژگی‌های گیاهان توسعه داده شده‌اند. این شاخص‌ها با در نظر گرفتن رفتار طیفی گیاهان در طیف الکترومغناطیسی به‌خصوص در محدوده‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک و براساس مجموعه‌ای از روابط ریاضی و ترکیبات جبری بین باندها، محاسبه می‌شوند [۷]. در این تحقیق، شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI^۵، ReNDVI^۶، MTCI^۷، NDIred^۸ و RTVI^۹ محاسبه و به‌عنوان باندهای جانبی در پردازش استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱. شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده در تحقیق (ρ میزان بازتاب در طول موج است)

منبع	رابطه	شاخص‌های پوشش گیاهی
[۳۵]	$\rho_{800} - \rho_{670}$	NDVI
[۳۶]	$\rho_{800} + \rho_{670}$	ReNDVI
[۳۷]	$\rho_{750} - \rho_{705}$	MTCI
[۳۸]	$\rho_{750} + \rho_{705}$	NDIred
[۳۹]	$\rho_{754} - \rho_{709}$	RTVI
[۳۸]	$\rho_{709} + \rho_{681}$	
[۳۸]	$\rho_{709} - \rho_{670}$	
[۳۹]	$\rho_{709} + \rho_{670}$	
[۳۹]	$(\rho_{800} - \rho_{709}) - 10(\rho_{800} - \rho_{554})$	

^۱Jeffries-Matusita

^۲Eigenvalue

^۳Pixel Purity Index

^۴Endmember

^۵Normalized Difference Vegetation Index

^۶Red Edge Normalized Difference Vegetation Index

^۷MERIS Terrestrial chlorophyll index

^۸Normalized difference index red

^۹Red-edge triangular vegetation index

۲-۵-۴. طبقه‌بندی تصاویر

در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای علاوه بر قابلیت تصاویر مورد استفاده در زمینه مورد نظر، انتخاب الگوریتم مناسب طبقه‌بندی نیز نقش اساسی در تهیه یک نقشه صحیح و قابل اطمینان دارد. الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت شده ماشین بردار پشتیبان، نقشه بردار زاویه طیفی و جنگل تصادفی با بکارگیری چهار سری مجموعه باندی (جدول ۲) و با ۵۰ درصد از نمونه‌ها انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است از ضریب شاخص بهینه^۱ برای انتخاب باندهای اصلی منتخب (مجموعه باندی چهارم) استفاده شد [۴۰].

جدول ۲. مجموعه باندی استفاده شده در تهیه نقشه تیپ جنگل

تعداد باندها	باندهای مورد استفاده	مجموعه باند
۱۰۳	تمامی باندهای اصلی تصویر پریسما (پس از حذف باندهای نویزی)	اول
۲۰	باندهای حاصل از الگوریتم حداقل سهم نویز	دوم
۱۰۸	باندهای اصلی+شاخص‌های پوشش گیاهی	سوم
۴۰	منتخب باندهای اصلی+الگوریتم حداقل سهم نویز+شاخص‌های پوشش گیاهی	چهارم

۲-۵-۴-۱. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)

این الگوریتم نظارت شده ناپارامتری بر پایه یادگیری ماشین به‌ویژه برای تجزیه و تحلیل داده‌های چند طیفی و ابرطیفی توسعه یافته است. مبنای کار در این الگوریتم طبقه‌بندی خطی داده‌ها است و سعی در یافتن پیکسل‌هایی از نمونه‌های تعلیمی (بردار پشتیبان) که بتواند یک صفحه‌ای بین آنها برای تفکیک کلاسه‌ها تعریف کند، دارد. با توجه به وجود تعداد زیادی کلاسه و باند، یک ابرصفحه^۲ ایجاد می‌شود. از آنجا که معمولاً کلاسه‌ها تنها با یک خط مستقیم به‌خوبی تفکیک نمی‌شوند، هسته‌های پردازشی یا کرنل‌های مختلفی طراحی شده است [۴۱]. در این پژوهش، از چهار کرنل Linear، RBF^۳، Ploynomial و Sigmoid استفاده شد.

۲-۵-۴-۲. الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM)

این الگوریتم میزان تشابه بین طیف هر پیکسل با طیف‌های تیپ‌های مختلف حاصل از نمونه‌های تعلیمی را از طریق اندازه‌گیری زاویه بین آنها بررسی می‌کند. دامنه این زاویه بین صفر تا یک است. هرچه قدر این زاویه کمتر باشد، نشانه تشابه بیشتر است. خروجی این الگوریتم شامل تصاویر سهم^۴ به تعداد کلاسه‌ها است [۴۲].

۲-۵-۴-۳. الگوریتم جنگل تصادفی (RF)

جنگل تصادفی یک روش ناپارامتری و از جمله روش‌های یادگیری ماشین است که از تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری درست شده است. در انجام این روش باید دو پارامتر مهم تعداد درخت تصمیم و تعداد باندهای مورد استفاده در هر یک از گره‌های درخت تعیین شوند. در فرآیند این الگوریتم نمونه‌ها به دو دسته آموزش و آزمون تقسیم می‌شوند. هر درخت تصمیم فرآیند طبقه‌بندی را انجام می‌دهد و از ترکیب نتایج تمام درختان و بر پایه رأی حداکثری، نتیجه طبقه‌بندی نهایی تولید می‌شود [۴۱].

۲-۶. پس‌پردازش طبقه‌بندی

پس از طبقه‌بندی، معمولاً به‌منظور حذف پیکسل‌های منفرد موجود در تصاویر حاصل و تهیه نقشه، فیلترهایی مانند نما، میانگین، حذف^۵ و اکثریت^۶ بر روی آنها اجرا می‌شود [۵]. در این تحقیق از فیلتر اکثریت به ابعاد ۳×۳ استفاده شد. به‌منظور برآورد صحت

^۱Optimum index factor

^۲Hyperpanel

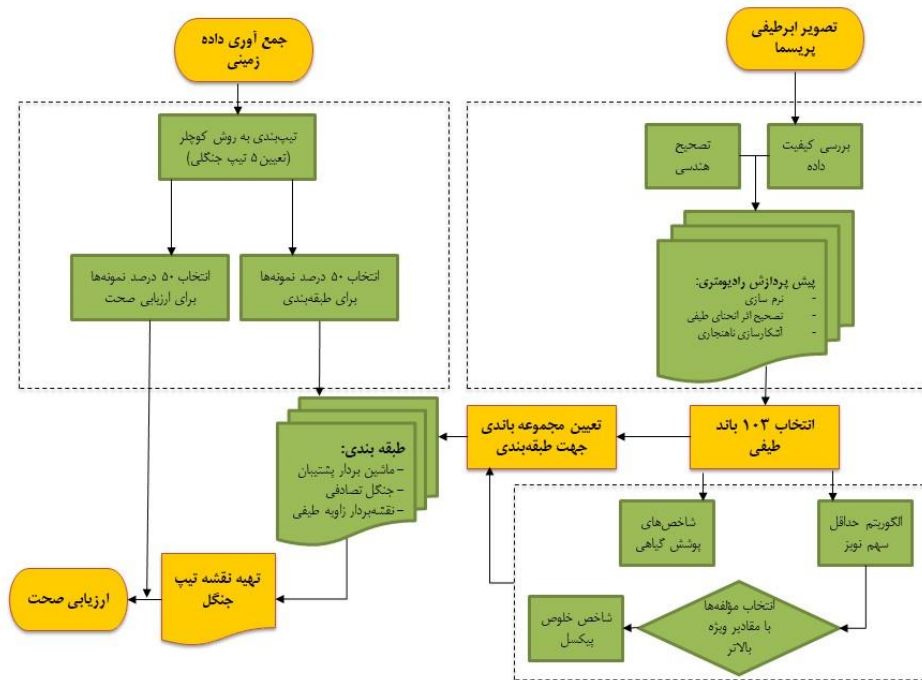
^۳Radial Basis Function

^۴Abundance

^۵Eliminate

^۶Majority

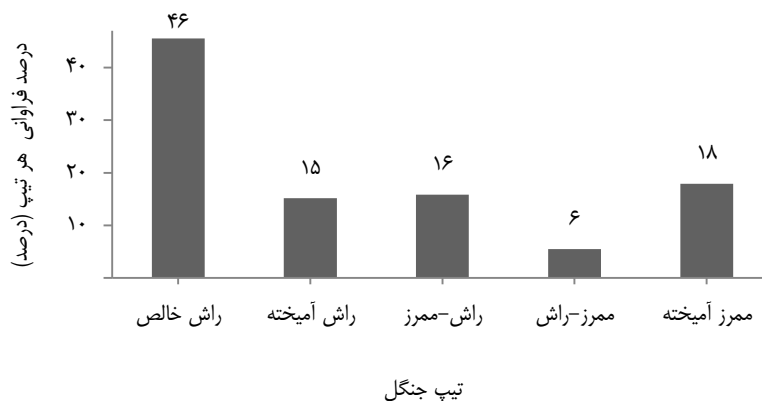
نتایج حاصل از طبقه‌بندی‌های مختلف، معیارهای صحت کلی^۱ و ضریب کاپا^۲ محاسبه شد. در شکل ۳ روندنمای پژوهش آورده شده است.



شکل ۳. روندنمای پژوهش

۳. یافته‌های پژوهش

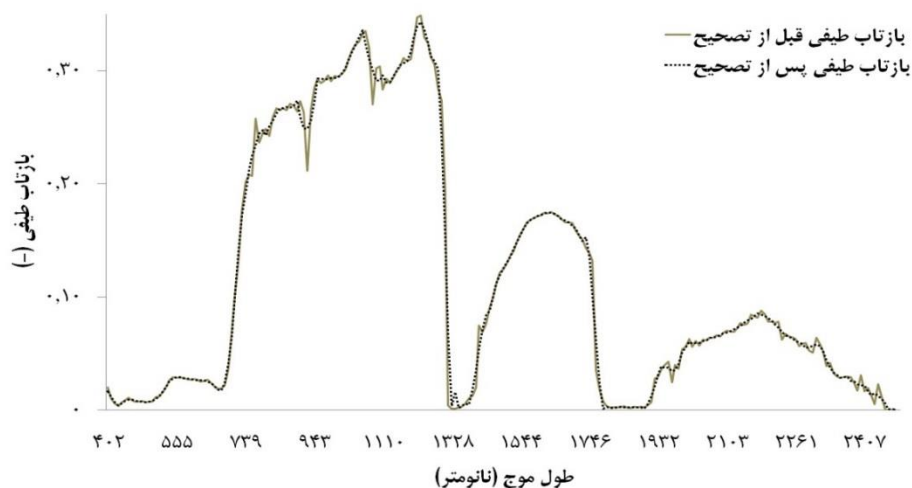
بر پایه کار میدانی انجام شده تپ‌های راش خالص، راش آمیخته (به‌عنوان تپ فرعی)، راش-ممرز، ممرز-راش و ممرز آمیخته (به‌عنوان تپ فرعی) در منطقه شناسایی شدند. فراوانی هر یک از تپ‌ها به درصد در ۱۳۱ قطعه نمونه در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. فراوانی هر یک از تپ‌ها در محل قطعه نمونه‌ها در منطقه مورد مطالعه

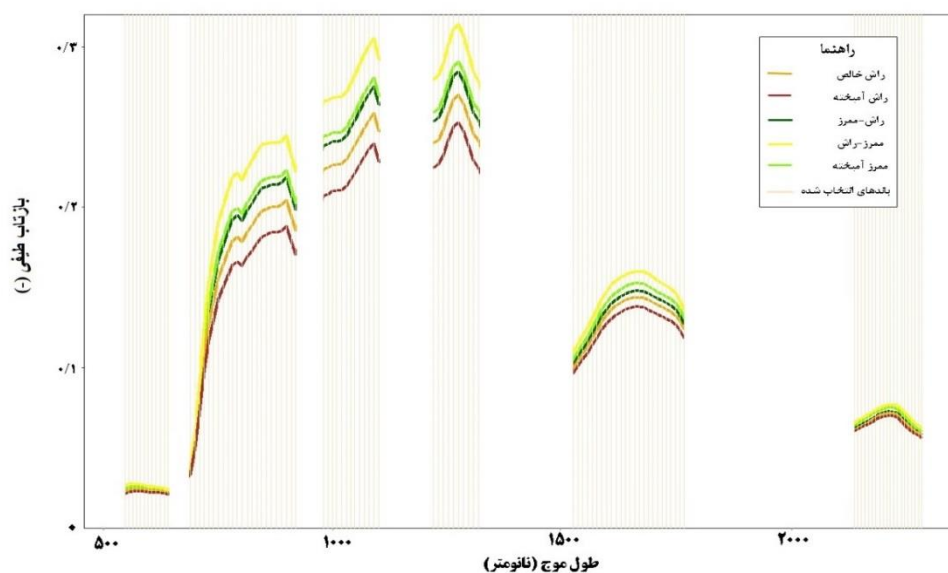
¹Overall Accuracy
²Kappa Coefficient

پس از نرم‌سازی داده پریسما به روش ساویتزکی-گولی، منحنی بازتاب طیفی برای پیکسل جنگلی بررسی شد که بر این اساس هموارسازی با حفظ شکل اصلی منحنی انجام شد. نرم‌سازی منحنی طیفی برای یک پیکسل جنگلی بر روی داده پریسما در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نرم‌سازی منحنی طیفی بر روی داده پریسما به روش ساویتزکی-گولی

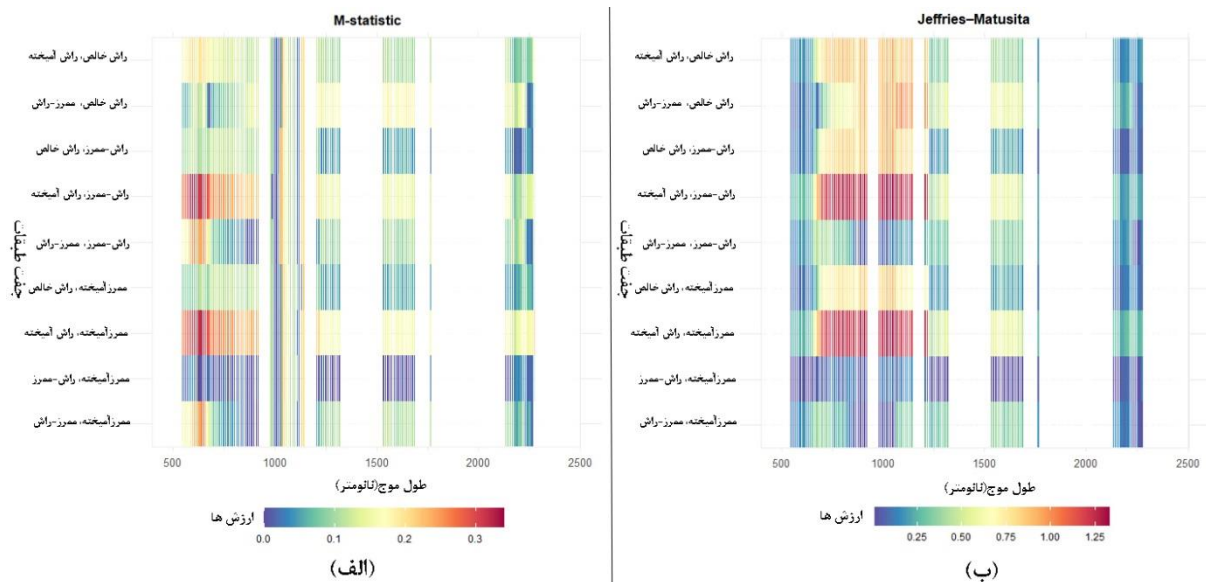
در ادامه، منحنی بازتاب طیفی پنج تیپ جنگل با استفاده از 10^3 باند اصلی داده‌های پریسما در محدوده‌های طیفی ۹۷۸-۵۴۶ (VNIR) و ۲۲۸۳-۹۸۸ (SWIR) تهیه شد که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی بازتاب طیفی پنج تیپ جنگل با استفاده از داده‌های پریسما

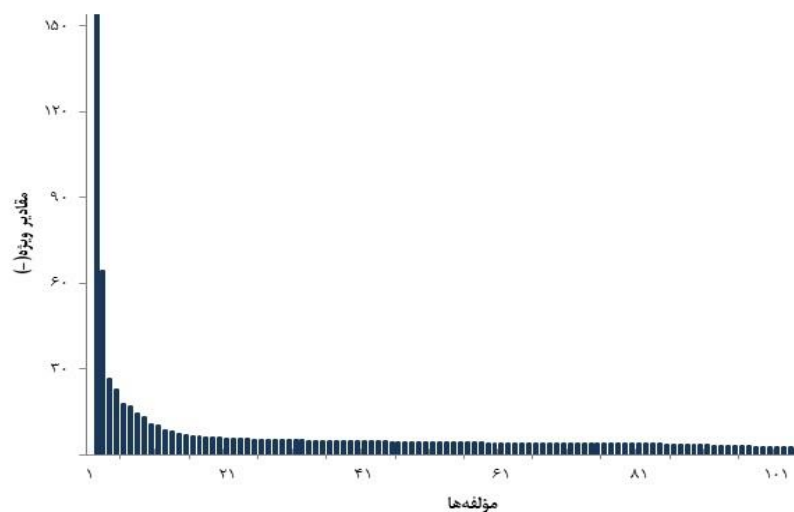
میزان تفکیک‌پذیری و تشابه طبقات با استفاده از روش‌های آماری M-statistic و جفریس ماتوسیتا بر روی 10^3 باند طیفی محاسبه شد. در روش M-statistic مقادیر بالاتر نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری خوب بین دو طبقه است، زیرا واریانس درون طبقه به حداقل و واریانس بین طبقات به حداکثر می‌رسد [۱۰]. همچنین براساس آماره جفریس ماتوسیتا، ایده‌آل‌ترین تفکیک‌پذیری بین دو طبقه، دارای مقدار ۲ است [۷]. ارزش‌های تفکیک‌پذیری براساس طول موج به نانومتر (محور افقی) و جفت طبقات (محور

عمودی) به همراه راهنمای طیف رنگی ارزش‌ها در شکل ۷ در دو بخش "الف" و "ب" ارائه شده است که نشان‌دهنده میزان تفکیک‌پذیری بین جفت طبقات تیب‌ها براساس محدوده طیفی است. ستون‌های سفید گویای باندهایی بوده که از تجزیه و تحلیل‌ها کنار گذاشته شدند. نتایج نشان داد که جفت طبقه راش-ممرز و ممرز آمیخته کمترین تفکیک‌پذیری را دارند (به ترتیب ارزش‌های بین ۰ تا ۰/۱ و ۰ تا ۱/۲۵ برای روش‌های M-statistic و جفریس ماتوسیتا)، و بهترین تفکیک‌پذیری در محدوده VNIR مشاهده می‌شود (به ترتیب ارزش‌های بین ۰/۳-۰/۲ و ۰/۲۵-۱/۷۵ برای روش‌های M-statistic و جفریس ماتوسیتا).



شکل ۷. تفکیک‌پذیری طبقات با استفاده از شاخص‌های M-statistic و جفریس ماتوسیتا در محدوده طیفی

برای کاهش مقدار نویز و بعد^۱ در باندها از الگوریتم حداقل سهم نویز بر روی ۱۰۳ باند طیفی استفاده و مقادیر ویژه به دست آمد (شکل ۸). بر این اساس ۲۰ مؤلفه اول از مجموعه مؤلفه‌های حاصل، که مقادیر ویژه بالاتری داشتند برای بکارگیری در مرحله طبقه‌بندی انتخاب شدند.



شکل ۸. مقادیر ویژه به دست آمده حاصل از الگوریتم حداقل سهم نویز برای ۱۰۳ باند طیفی

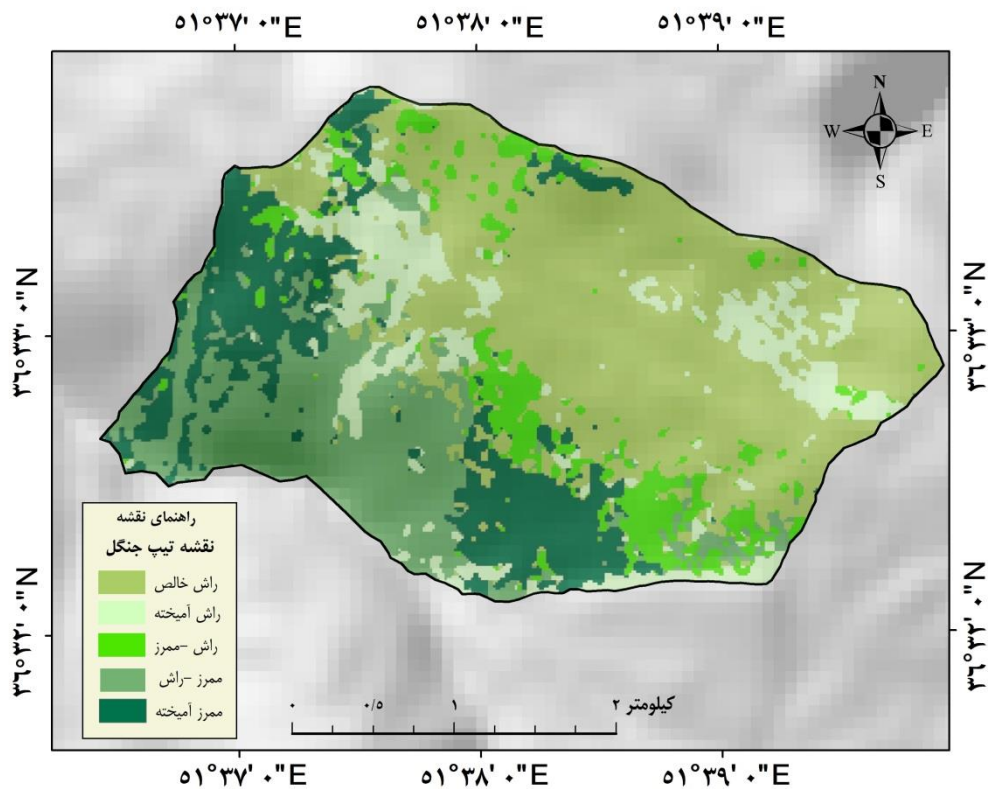
^۱Dimension

در جدول ۳ نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی برای هر سه الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، نقشه‌بردار زاویه طیفی و جنگل تصادفی و در شکل ۹ نقشه تپ مربوط به بهترین نتیجه ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی برای سه الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، نقشه‌بردار زاویه طیفی و جنگل تصادفی

مجموعه باند	باندهای مورد استفاده	الگوریتم‌ها	صحت کلی	ضریب کاپا
اول	تمامی باندهای اصلی تصویر پریسما (پس از حذف باندهای نویزی)	ماشین بردار پشتیبان	۴۱/۱۶	۰/۱۷
		الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی	۳۱/۸۵	۰/۱۲
		الگوریتم جنگل تصادفی	۳۱/۳۰	۰/۱۰
دوم	باندهای حاصل از الگوریتم حداقل سهم نویز	ماشین بردار پشتیبان	۵۳/۰۹	۰/۳۸
		الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی	۳۷/۶۸	۰/۲۲
		الگوریتم جنگل تصادفی	۴۳/۱۹	۰/۲۵
سوم	باندهای اصلی+شاخص‌های پوشش گیاهی	ماشین بردار پشتیبان	۳۸/۵۹	۰/۱۵
		الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی	۲۷/۷۸	۰/۲۱
		الگوریتم جنگل تصادفی	۳۳/۴۰	۰/۱۷
چهارم	منتخب باندهای اصلی+الگوریتم حداقل سهم نویز+شاخص‌های پوشش گیاهی	ماشین بردار پشتیبان	۴۱/۶۵	۰/۲۱
		الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی	۳۰/۹۱	۰/۱۳
		الگوریتم جنگل تصادفی	۴۱/۳۴	۰/۲۳

براین اساس بهترین نتایج مربوط به الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و سپس الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از داده‌های حاصل از الگوریتم حداقل سهم نویز به ترتیب با صحت‌های کلی ۵۳/۰۹ و ۴۳/۱۹ درصد و ضریب کاپای ۰/۳۸ و ۰/۲۵ می‌باشد.



شکل ۹. نقشه نهایی تپ جنگل حاصل از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در بخش گرازبن با ۵ تپ

۴. بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

شناسایی واحدهای همگن و تفکیک آنها در جنگل از جمله تپ‌های جنگلی، اصولی‌ترین راه مدیریت بهینه جنگل است [۴]. تهیه نقشه تپ جنگل در حقیقت زیربنای سایر عملیات و تصمیمات جنگل‌شناسی و جنگلداری است [۴۳]. تصاویر ابرطیفی و روش‌های نوین سنجش‌ازدور برای رسیدن به این مهم می‌توانند بسیار راه‌گشا می‌باشند. در پژوهش حاضر تهیه نقشه تپ در بخشی از جنگل‌های هیرکانی با استفاده از داده‌های ابرطیفی پریسما براساس سه طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان، نقشه‌بردار زاویه طیفی و جنگل تصادفی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تپ‌های جنگل موجود در منطقه براساس کارمیدانی شامل راش خالص، راش آمیخته (به‌عنوان تپ فرعی)، راش-ممرز، ممرز-راش و ممرز آمیخته (به‌عنوان تپ فرعی) بوده است. انتظار این بود که زیاد بودن توان تفکیک طیفی این داده ماهواره‌ای منجر به تهیه نقشه‌ای با صحتی بیشتر از آنچه که تاکنون به کمک تصاویر ماهواره‌ای متداول مانند لندست و سنتینل تهیه شده است، شود. اما صحت متوسط داده‌های ابرطیفی مورد استفاده جهت تهیه نقشه تپ‌بندی در پژوهش حاضر تأییدی بر این استدلال نبود که با یافته‌های Vangi و همکاران (۲۰۲۱) مبنی بر استفاده از داده پریسما برای تفکیک تپ‌های جنگلی همسو نبود. همچنین علی‌رغم اینکه امروزه داده‌های ماهواره‌ای دیگر نیاز به تصحیح هندسی ندارند، در مورد پریسما این چنین نبود و این داده نیازمند تصحیح مذکور می‌باشد، که در مطالعات صورت پذیرفته با این داده به‌منظور تهیه نقشه‌های آتش سوزی جنگل [۴۴] و تفکیک تپ‌های جنگلی در سایر نقاط دنیا (همانند مطالعات Delodu و همکاران (۲۰۲۳) و Vangi و همکاران (۲۰۲۱)) نیز اشاره به لزوم تصحیح مذکور شده است. براساس نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی در پنج طبقه مورد مطالعه (جدول ۳)، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و سپس الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از داده‌های حاصل از پردازش حداقل سهم نویز به‌ترتیب با افزایش ۱۱/۹۳ و ۱۱/۸۹ درصدی در میزان صحت کلی و مقدار کاپای ۰/۳۸ و ۰/۲۵ بهترین نتیجه را داشتند. همچنین الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به‌ترتیب با اختلاف ۹/۹ و ۱۵/۴۱ درصد برای صحت کلی و ۰/۱۳ و ۰/۱۶ برای کاپا نسبت به الگوریتم جنگل تصادفی و الگوریتم نقشه‌بردار زاویه طیفی عملکرد بهتری را نشان داد. نتایج بکارگیری مجموعه باندی چهارم (منتخب باندهای اصلی + الگوریتم حداقل سهم نویز + شاخص‌های پوشش گیاهی) بیانگر افزایش ۰/۴۹ و ۱۰/۰۴ درصدی صحت کلی به‌ترتیب برای دو الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم جنگل تصادفی می‌باشد که مشابه با پژوهش Nasiri (۲۰۲۰) استفاده از باندهای جانبی به‌همراه شاخص پوشش گیاهی نتایج بهتری نسبت به باندهای اصلی ارائه داده است.

باوجود اینکه کیفیت مجموعه داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های طبقه‌بندی مورد استفاده تا حدودی مناسب بودند، اما نقشه‌های تپ حاصل، صحت‌های کلی متوسط و ضرائب کاپای پایینی را نشان دادند که دلیل این نکته را می‌توان در تشابه بازتاب طیفی تپ‌ها دانست. زیرا همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، بازتاب طیفی راش-ممرز، ممرز آمیخته و تا حدی ممرز-راش به یکدیگر نزدیک هستند. تفکیک‌پذیری و تشابه طبقات در شکل ۷ نیز تأییدی بر این مهم می‌باشد. همچنین در پژوهشی مشابه در جنگل‌های هیرکانی، Darvishsefat و همکاران (۲۰۰۹) منحنی طیفی گونه‌های راش و ممرز را بسیار شبیه به هم ارائه نمودند، که این مهم را می‌توان مطابق با تشابه بازتاب طیفی دو تپ راش-ممرز و ممرز آمیخته و همچنین ممرز-راش دانست اما در خصوص تشابه بازتاب طیفی بین دو گونه راش و ممرز در تپ‌های راش آمیخته و ممرز آمیخته صادق نیست. همچنین Nasiri (۲۰۲۰) کمترین میزان تفکیک‌پذیری را در این بخش از جنگل‌های هیرکانی برای راش-ممرز و ممرز-راش عنوان داشت که مشابه با یافته‌های پژوهش حاضر می‌باشد. به‌طور کلی تداخل طیفی برخی از تپ‌ها باعث پایین آمدن صحت کلی طبقه‌بندی شده است. زیرا تپ‌ها در فواصل مکانی اندک در منطقه مورد مطالعه تغییر نموده و در نتیجه باعث تشکیل توده‌های آمیخته با تداخل طیفی بالا می‌شود که باعث اختصاص پیکسل‌های آنها به طبقات اشتباه شده است. همچنین مشابه با مطالعه Shataei Joibari (۲۰۱۲) در تهیه نقشه تپ جنگل در منطقه خیرود، پراکنش تپ‌ها در شرایط مختلف فیزیوگرافی می‌تواند باعث بازتاب‌های طیفی متفاوت برای یک تپ معین گردد و همچنین بیشترین میزان خطا در تپ‌های آمیخته رخ می‌دهد [۴۵]. همان‌گونه که در مطالعه‌ای که به‌منظور بررسی رفتار طیفی گونه‌های راش، ممرز، توسکا، بلوط و انجیلی در بخشی از جنگل‌های هیرکانی توسط Abbasi (۲۰۰۹) انجام شد، بازتاب طیفی دو تپ راش آمیخته و ممرز آمیخته، دارای همپوشانی طیفی بسیاری با

سایر تیپ‌ها بود [۴۶]. این مهم مشابه با نتایج تفکیک‌پذیری تیپ ممرز آمیخته (شکل ۷) در پژوهش حاضر می‌باشد. استفاده از روش نرم‌سازی و رفع نویز همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، باعث بهبود منحنی بازتاب شد. همچنین استفاده از الگوریتم حداقل سهم نویز و باندهای جانبی همان‌طور که بیان شد نتایج بهتری نسبت به باندهای اصلی ارائه داد. در واقع استفاده از ویژگی‌های طیفی به‌تنهایی در فرآیند طبقه‌بندی هنگامی که رفتارهای طیفی عوارض نزدیک باشند (همانند طیف تیپ‌های ممرز آمیخته و راش ممرز به سایر تیپ‌ها)، منجر به صحت بالایی نمی‌شود و استفاده از روش‌های چون الگوریتم حداقل سهم نویز (مشابه با تحقیقات Sabat Tomala و همکاران (۲۰۲۰) و Vaglio Laurin و همکاران (۲۰۱۶)) و همراه آن استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی می‌تواند یک راهکار مناسب به‌منظور استخراج هر چه بهتر اطلاعات در بحث طبقه‌بندی باشد. مقایسه روش‌های طبقه‌بندی در مجموعه باند اصلی (۱۰۳ باند) و حاصل از الگوریتم حداقل سهم نویز گویای صحت کلی (به ترتیب افزایش ۱۱/۹۳ و ۱۱/۸۹ درصد) و ضریب کاپای (۰/۱۷ و ۰/۳۸) بهتر ماشین بردار پشتیبان نسبت به جنگل تصادفی بوده که این مهم مطابق با بررسی‌های Puletti و همکاران (۲۰۱۶) و Raczko و Zagajewski (۲۰۱۷) می‌باشد. زیرا همانند یافته‌های پژوهش Nasiri (۲۰۲۰)، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان توانایی خوبی در طبقه‌بندی با خصوصیات طیفی نزدیک به هم دارد که به چگونگی ایجاد مرز تصمیم‌گیری بهینه آن مربوط می‌شود. همچنین نتایج بکارگیری مؤلفه‌های تبدیل حداقل سهم نویز در مجموعه باندی گویای بهبود صحت طبقه‌بندی نسبت به مجموعه باند اصلی است (مطابق جدول ۳) که با یافته‌های Sabat Tomala و همکاران (۲۰۲۰) مبنی بر بهبود صحت کلی با بکارگیری باندهایی با بهترین تمایز بین طبقات حاصل از روش الگوریتم حداقل سهم نویز برای طبقه‌بندی مشابهت دارد. در نهایت مشخص شد که علی‌رغم اینکه سنجنده‌های ابرطیفی به‌واسطه اخذ تعداد زیادی از باندهای طیفی دارای اطلاعات طیفی بالایی هستند اما در مناطقی که عوارض و پدیده‌ها (نظیر تیپ‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر)، دارای رفتار طیفی نزدیک به هم هستند، نیازمند استفاده از روش‌هایی همچون الگوریتم حداقل سهم نویز به‌منظور رسیدن به صحت بالاتر می‌باشد. با این وجود، نویز به نسبت زیاد داده‌های پریسما همراه با رفتار طیفی نزدیک تیپ‌های جنگل در این بخش از هیرکانی مانع از کسب نتایج رضایت‌بخش شد. همچنین بهتر است از روش‌های دیگر برای انتخاب باندهای منتخب همانند روش ارتقاء یافته شاخص بهینه که در مطالعه Hu و همکاران (۲۰۱۸) استفاده شده است را مورد آزمون قرار داد. پیشنهاد می‌شود با توجه به ارتقای ماهواره پریسما، از تصاویر جدید برای تهیه نقشه تیپ جنگل استفاده شود.

۵. منابع

- [1] Rajabpour, M., Darvishsefat, A.A., & Khalilpour, A. (2009). Capability of SPOT5-HRG data for forest density mapping (Case study: Deilaman forests in Guilan province). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 1(18), 132-142. (In Persian)
- [2] Gorji Bahri, Y. (2000). Investigation the classification of typology and planning of the research forest of Vaz, *PhD thesis, Faculty of natural resources*, University of Tehran. 139 p. (In Persian)
- [3] Marvie Mohajer, M.R. (2005). *Silviculture*, University of Tehran Press, Tehran, 410 p. (In Persian)
- [4] Shataei Joibari, S., Darvishsefat, A.A., & Sobhani, H. (2002). Comparison of pixel-based and object-based approaches for forest type mapping using satellite data. *Journal of the Iranian natural Resources*, 3(60), 869-881. (In Persian)
- [5] DarvishSefat, A.A., Abbasi, M., & Marvi Mohajer, M. (2009). Investigation on the possibility of beech forest type mapping using Landsat ETM+ data (case study: Kheyroud forest). *Iranian Journal of Forest*, 1(2), 105-113. (In Persian)
- [6] Sheykhi, H., Darvishsefat, A.A., Fatehi, P., Rajab Pourrahmati, M., & Etemad, V. (2020). Investigation on the capability of Landsat-8 and Sentinel-2 data for mapping forest type in the Kojur watershed of Hyrcanian forests. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 27(2), 79-98. (In Persian)
- [7] Nasiri, V. (2020). Estimation forest attributes using sentinel-2 imagery and Unmanned Aerial Vehicle. *PhD thesis, Agriculture and Natural Resources Campus Faculty of Natural Resources*, University of Tehran, 130 p. (In Persian)

- [8] Hennessy, A., Clarke, K., & Lewis, M. (2020). Hyperspectral classification of plants: a review of waveband selection generalisability. *Remote Sensing*, 1(12), 1-27.
- [9] Lv, W., & Wang, X. (2020). Overview of hyperspectral image classification, Hindawi. *Journal of Sensor*, (2), 1-13.
- [10] Vangi, E., D'Amico, G., Francini, S., Giannetti, F., Lasserre, B., Marchetti, M., & Chirici, G. (2021). The new hyperspectral satellite PRISMA: imagery for forest types discrimination. *Sensors (Basel)*, 21(4), 1-19.
- [11] George, R., Padalia, H., & Kushwaha, S.P.S. (2014). Forest tree species discrimination in western Himalaya using EO-1 Hyperion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (28), 140-149.
- [12] Casa, R., Pignatti, S., Pascucci, S., Ionca, V., Mzid, N., & Veretelnikova, I. (2020). Assessment of PRISMA imaging spectrometer data for the estimation of topsoil properties of agronomic interest at the field scale. *22nd EGU General Assembly, held online*. May. 4-8.
- [13] Darvishsefat, A. A. (2007). Application of hyperspectral data for forest stand. *Journal of the Iranian Natural Resources*, 4(59), 831-841. (In Persian)
- [14] Puletti N.A., Camarretta, N.A., & Corona, P.A. (2016). Evaluating EO1-Hyperion capability for mapping conifer and broadleaved forests. *European Journal of Remote Sensing*, (49), 157 – 169.
- [15] Vaglio Laurin., Gaia, P., Nicola, H., William, L., Veraldo, C., Piermaria, P., Dario, C., Q., & Valentini, R. (2016). Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment* (176), 163-176.
- [16] Raczko, E., & Zagajewski, B. (2017). Comparison of support vector machine, random forest and neural network classifiers for tree species classification on airborne hyperspectral APEX images. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 144-154.
- [17] Luo, X.A., & Xu, S.B. (2019). Forest mapping from hyperspectral image using deep belief network. *15th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks*, 15, 395- 398.
- [18] Sabat-Tomala, A., Raczko, E., & Zagajewski, B. (2020). Comparison of support vector machine and random forest algorithms for invasive and expansive species classification using airborne hyperspectral data. *Remote Sensing*, 12(3), 1-21.
- [19] Javanmiripour, M., Mohajer, J., Etemad, M., & Jourgholami, M. (2017). Determination of forest stands growth through Swiss control (Study area: Gorazbon district). *Journal of Forest Research and Development*, 3(3), 263-273. (In Persian)
- [20] Bayat, M., Namiranian, M., Zobeiri, M., & Fathi, J. (2013). Determining growth increment and density of trees in forest, using permanent sample plots (Case study: Gorazbon district of Kheyroud Forest). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 3(21), 438-424. (In Persian).
- [21] Savitzky, A., & Golay, M.J.E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Anal. Chem*, 36(8), 1627-1639.
- [22] Boroumand, N. (2023). The Influence of symbiotic *Arbuscular Mycorrhizal* fungi on the mount atlas Pistachio (*Pistacia atlantica* subsp. *mutica*) Seedling's spectral reflectance. *M.Sc. thesis*, Faculty of Natural Resources, Department of Forestry and Forest Economic, University of Tehran, 101 p. (In Persian)
- [23] Schmid, M., Rath, D., & Diebold, U. (2022). Why and how savitzky-golay filters should be replaced. *ACS Measurement Science*, (2), 185-196.
- [24] Seidin, S.A., Veldanzoz, M.J., & Maghsoudi, Y. (2013). Discovery of hydrocarbon seeps using target detection methods in hyperspectral images. *Oil and Gas Exploration and Production*, (69), 111-63. (In Persian)
- [25] Koloniatis, K., Andronis, V., & Karathanassi, V. (2020). Spectral smile correction for airborne imaging spectrometers. *Hyperspectral Remote Sensing*, 23-44.
- [26] Boardman, J.W., & Huntington, J.F. (1995). Semi-quantitative mineralogical and geological mapping with m AVIRIS data. *Proceedings of Spectral Sensing Research*, 26-1.
- [27] Schlerfa, M., Atzbergerb, C., Hilla, J. (2005). Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, (95), 177-194.

- [28] Fatehi, P., Damn, A., Schweiger, A.K., Schaepman M.E., & Kneubühler, M. (2015). Mapping Alpine aboveground biomass from imaging spectrometer data: a comparison of two approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(8), 3123-3129.
- [29] Reed I., & X. Yu. (1990). Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, (38), 1760-1770.
- [30] Richards, J.A. (1999). Remote sensing digital image analysis, Springer-Verlag, Berlin, 240 p.
- [31] Boardman, J.W., Kruse, F.A., & Green, R.O. (1995). Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. *Proceedings of the Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop, Pasadena, California, JPL Publication*, (1), 23-26.
- [31] Green, A.A., Berman, M., Switzer, P., & Craig, M.D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1(26), 65-74.
- [33] Khanhdar Kolver, M. (2016). The mineral chemistry of intrusive rocks and the application of remote sensing in the identification of rocks in Ahoan pass, Northeast of Semnan. *M.Sc. thesis*, Faculty of Earth sciences, Shahrood University of Technology. 200 p. (In Persian).
- [34] Shahriari, H., Ranjbar, H., & Artman, M. (2012). The application of SMACC and PPI methods in the extraction of end members for the mapping of hydrothermal changes in the copper porphyry area of Dareh Zar. *31st Earth Science Conference*, 1-7. (In Persian)
- [35] Rouse, J.W., R.H. Haas, Jr., Schell, J.A., Deering, D.W., & Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retro gradation (green wave Effect) of natural vegetation. Texas A&M Univ., College Station, Texas, 390 p.
- [36] Gitelson, A., & Merzlyak, M.N. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, (22), 247-252
- [37] Clevers, J. G., Kooistra, L., & Brande, M. (2017). Using sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sensing*, 9(5), 405.
- [38] Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C.M., Rivera, J.P., Alonso, L., & Moreno, J. (2012). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, (46), 42-52.
- [39] Chen, P. F., Tremblay, N., Wang, J.H., Vigneault, P, Huang, W.J., & Li, B.G. (2010). New index for crop canopy fresh biomass estimation. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(2), 512-517.
- [40] Hu, L., Wang, Q. & Xing, T. (2018). An algorithm of improved optimum index factor band selection from Hyperspectral remote sensing image. *International conference of physics, computing and mathematical modeling*, 1-6.
- [41] Darvishsefat, A.A. (2023). Course booklet of remote sensing, University of Tehran.
- [42] Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., & Goetz, A.F.H. (1993). The spectral image processing system (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment, Special issue on AVIRIS*, (44), 145-163.
- [43] Ghahreman, A. (2007). Flora of Iran, *Research institute of forest and rangelands*, 1-26. (In Persian).
- [44] Delogu, G., Caputi, E., Perretta, M., Nicolina, M., & Boccia, L. (2023). Using PRISMA Hyperspectral data for land cover classification with artificial intelligence support. *Sustainability Journal*, (15), 1-26.
- [45] Shataei Joibari. (2012). Investigating the possibility of preparing a map of forest types using satellite data. *PhD thesis, University of Tehran*. 155 p. (In Persian)
- [46] Abbasi, M. (2009). Investigation of the spectral signature of forest species leaf: *Fagus orientalis*, *Quercus castaneifolia*, *Carpinus betulus*, *Alnus subcordata*, *Parotia persica* using field spectroradiometry. *PhD thesis, Agriculture and Natural Resources Campus Faculty of Natural Resources, University of Tehran*, 135 p. (In Persian)